



별첨 사본은 아래 출원의 원본과 동일함을 증명함.

This is to certify that the following application annexed hereto
is a true copy from the records of the Korean Intellectual
Property Office.

출 원 번 호 : 10-2003-0067338
Application Number

출 원 년 월 일 : 2003년 09월 29일
Date of Application SEP 29, 2003

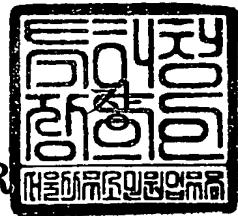
출 원 인 : 한국전자통신연구원
Applicant(s) Electronics and Telecommunications Research Insti



2003 년 10 월 09 일

특 허 청

COMMISSIONER



【서지사항】

【서류명】	특허출원서
【권리구분】	특허
【수신처】	특허청장
【제출일자】	2003.09.29
【발명의 명칭】	다중양자우물을 갖는 전계흡수형 광 변조기
【발명의 영문명칭】	Electro-absorption optical modulator having multiple quantum well
【출원인】	
【명칭】	한국전자통신연구원
【출원인코드】	3-1998-007763-8
【대리인】	
【성명】	신영무
【대리인코드】	9-1998-000265-6
【포괄위임등록번호】	2001-032061-5
【발명자】	
【성명의 국문표기】	강영식
【성명의 영문표기】	KANG, Young Shik
【주민등록번호】	720127-1462123
【우편번호】	302-282
【주소】	대전광역시 서구 월평2동 주공아파트 210-802
【국적】	KR
【발명자】	
【성명의 국문표기】	김제하
【성명의 영문표기】	KIM, Je Ha
【주민등록번호】	601020-1403215
【우편번호】	305-761
【주소】	대전광역시 유성구 전민동 엑스포아파트 207-110
【국적】	KR
【발명자】	
【성명의 국문표기】	임지연
【성명의 영문표기】	LIM, Ji Youn
【주민등록번호】	730703-2231725

【우편번호】	305-755		
【주소】	대전광역시 유성구 어은동 한빛아파트 137-201		
【국적】	KR		
【발명자】			
【성명의 국문표기】	김성복		
【성명의 영문표기】	KIM, Sung Bock		
【주민등록번호】	650913-1400411		
【우편번호】	305-761		
【주소】	대전광역시 유성구 전민동 엑스포아파트 209-1605		
【국적】	KR		
【공지예외적용대상증명서류의 내용】			
【공개형태】	학술단체 서면발표		
【공개일자】	2003.05.14		
【심사청구】	청구		
【취지】	특허법 제42조의 규정에 의한 출원, 특허법 제60조의 규정에 의한 출원심사 를 청구합니다. 대리인 신영무 (인)		
【수수료】			
【기본출원료】	20	면	29,000 원
【가산출원료】	10	면	10,000 원
【우선권주장료】	0	건	0 원
【심사청구료】	6	항	301,000 원
【합계】	340,000 원		
【감면사유】	정부출연연구기관		
【감면후 수수료】	170,000 원		
【기술이전】			
【기술양도】	희망		
【실시권 허여】	희망		
【기술지도】	희망		
【첨부서류】	1. 요약서·명세서(도면)_1통 2. 공지예외적용대상(신규성상실의 예외, 출원시의특례)규정을 적용받 기 위한 증명서류_1통		

【요약서】**【요약】**

본 발명은 전계흡수형 반도체 광 변조기에 관한 것이다. 반도체를 이용한 전계흡수형 광 변조기는 소자에 인가되는 바이어스 전압에 따른 흡수곡선의 이동에 기인한 광 흡수 변화를 이용한다. 이 때 바이어스 전압에 따른 광 흡수 정도는 인가되는 바이어스에 대한 출력광의 전달함수로 표시되며, 전달함수는 재료의 특성상 비선형적인 모양을 갖는다. 디지털 광통신 시스템의 신호변조와는 달리 아날로그 광 전송 시스템에서는 광 변조기의 전달함수가 지닌 비선형적인 특성이 전기신호를 광신호로 바꾸어 줄 때 신호왜곡을 발생시켜 시스템의 성능 저하를 일으킬 수 있다. 통상적인 광 변조기의 흡수층은 동일한 너비를 갖는 양자우물로 구성된 반면, 본 발명에 따른 광 변조기의 흡수층은 서로 다른 너비를 갖는 양자우물의 조합으로 이루어져 선형성이 양호하다.

【대표도】

도 8a

【색인어】

광 변조기, 흡수층, 양자우물, 전달함수, 선형성

【명세서】**【발명의 명칭】**

다중양자우물을 갖는 전계흡수형 광 변조기 {Electro-absorption optical modulator having multiple quantum well}

【도면의 간단한 설명】

도 1a는 두개의 전계흡수형 광 변조기를 집적한 종래 광 변조기의 구조도.

도 1b는 도 1a에 도시된 광 변조기의 전달함수에 대한 distortion coefficient의 그래프.

도 2는 파장이 다른 두개의 광원을 전계흡수형 광 변조기에 입사시키는 종래 광 변조기의 구조도.

도 3은 인가되는 전기신호에 왜곡(predistortion)을 가하는 종래 광 변조기의 구조도.

도 4a는 본 발명의 실시예에 따른 전계흡수형 광 변조기의 단면도.

도 4b는 양자우물의 너비에 따른 전달함수와 이상적인 전달함수를 도시한 그래프.

도 5a는 도 4a에 도시된 광 변조기의 에피 구조를 도시한 단면도.

도 5b는 도 5a에 도시된 에피 구조에서 측정된 전기장에 대한 흡수 스펙트럼을 도시한 그래프.

도 6a 및 도 6b는 V_0 및 a 값에 대한 전달함수의 모양을 도시한 그래프.

도 7a는 8nm, 10nm 및 12nm의 양자우물과 8nm와 12nm가 조합된 양자우물의 전달함수를 도시한 그래프.

도 7b는 도 7a에 도시된 전달함수들에 대한 IMD 3 특성을 도시한 그래프.

도 8a는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 광 변조기의 에피 구조를 도시한 단면도.

도 8b는 도 8a에 도시된 흡수층의 optical field 분포와 상대적인 굴절율을 도시한 그래프.

<도면의 주요 부분에 대한 부호의 설명>

1, 2, 23, 32: 광 변조기 3: 3-dB 커플러

21, 22: 제 1 및 제 2 광원 24: 광 검출기

31: 비선형 발생기 41: p형 InP 클래드층

42: 다중양자우물 43: n형 InP 기판

44: p형 전극 45: n형 전극

46: 폴리이미드 47: 입력광

48: 출력광 42a: 좁은 우물

42b: 넓은 우물

【발명의 상세한 설명】

【발명의 목적】

【발명이 속하는 기술분야 및 그 분야의 종래기술】

<23> 본 발명은 전계흡수형 광 변조기에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 흡수층이 서로 다른 너비를 갖는 양자우물의 조합으로 구성된 다중양자우물을 갖는 전계흡수형 광 변조기에 관한 것이다.

<24> 디지털 광통신 시스템에서 신호 변조용으로 활용되는 반도체 광 변조기는 통상적으로 입사되는 광의 세기를 단속하는 역할을 한다. 즉, 입력되는 전기 신호에 따라 출력광의 세기를

조절한다. 이와 같이 IM 변조(intensity modulation)된 디지털 신호는 일정 기준보다 세기가 큰 신호("1"의 상태)와 그렇지 않은 신호("0"의 상태)로 단순히 구별된다.

<25> 광 변조기는 디지털 통신용 IM 변조뿐만 아니라 일정 주파수의 전기 신호에 맞추어 광 세기의 출력을 조절하는 아날로그 광 변조기로도 사용될 수 있다. 아날로그 광 변조기는 디지털로 변조된 신호(BPSK, QPSK, QAM 등)가 실려 있는 고주파(RF) 신호를 광 신호로 변환하여 광 섬유로 전송하는 ROF(Radio-over-Fiber) 링크 광 전송 기술의 핵심 신호원으로 활용되고 있다. 이 경우 광 변조기는 입력 전기 신호에 대한 광 신호의 변조 왜곡을 최소화시키는 것이 가장 중요하며, 이러한 점이 아날로그 광 변조기와 디지털 광 변조기를 차별화하는 특징이 되고 있다.

<26> 고주파 광 변조기 중에서 다중양자우물을 갖는 전계흡수형 광 변조기는 고주파 동작속도와 낮은 소비전력을 갖으며, 다른 광 소자와의 접적이 가능한 소자로서, ROF 기술에서 주목을 받고 있다. 그러나 전계흡수형 광 변조기는 전기-광 전달함수의 특성이 갖는 비선형성으로 인해 전송시 발생되는 신호왜곡 현상을 극복해야 하는 과제를 가지고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 종래의 기술을 살펴보면 다음과 같다.

<27> 도 1a는 두개의 전계흡수형 광 변조기를 접적한 구조로서, 3-dB 커플러(coupler)(3)를 이용하여 입력 광 신호를 동일한 광 파워를 갖도록 나누고, 각각의 광 신호를 광 변조기(1 및 2)로 입사되도록 한 후 적절한 바이어스 전압과 modulation depth를 선택하여 전달함수의 비선형성에 의해 나타나는 intermodulation distortion(IMD)을 최소화시킨다. 즉, IMD 값을 작게 하여 선형성을 향상시킨다.

<28> 도 1b는 두개의 전계흡수형 광 변조기의 전달함수에 대한 distortion coefficient의 그래프이다. 광 변조기들에 인가할 바이어스 전압을 선택할 때 3rd harmonic distortion 값이 0이 되

는 전압(V_{b1}, V_{b2})을 선택하면, 2nd order distortion coefficient(선 A)는 그 크기가 비슷하고 부호는 반대가 된다. 또한, 3rd order distortion coefficient(선 B)에 대해서도 바이어스 전압 근방에서 서로 부호가 반대가 된다. 즉, 2nd order distortion 과 3rd order distortion 값을 최소화할 수 있어 결국, 광 변조기의 선형성이 증가된다 [M. Shin and S. Hong, "A Novel Linearization Method of Multiple Quantum Well (MQW) Electroabsorption Analog Modulator", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.38(1999) pp.2569-2572 참조].

<29> 도 2는 파장이 다른 두개의 광원을 전계흡수형 광 변조기에 입사시키는 구조로서, 두개의 케리어(carrier) 주파수(ω_1, ω_2)를 갖는 광을 광 변조기에 각각 입력시켜 선형성을 향상시킨다. 제 1 광원(primary)(21)으로 $1.32\mu\text{m}$ 의 파장(주파수: ω_1)을 갖는 빛과 제 2 광원(secondary)(22)으로 $1.28\sim1.35\mu\text{m}$ 의 파장(주파수: ω_2)을 갖는 빛을 선택할 수 있는 파장가변레이저(tunable laser)를 사용한다. 제 1 및 제 2 광원(21 및 22)에서 나오는 빛을 동시에 광변조기(23)로 입사시킨다. 이 때 광 변조기(23)에는 고주파(RF) 신호가 바이어스 전압과 함께 입력된다. 광 변조기(23)를 통과하여 나온 빛의 주파수들을 보면, 도 2에 도시된 바와 같이 케리어 주파수 ω_1, ω_2 옆에 고주파(RF) 신호가 실려 있고, 그 옆에 $3\omega_{RF} + \omega_1, 3\omega_{RF} + \omega_2$ 가 위치하게 된다. 파장가변 레이저의 파장을 적절히 조절하면 원하지 않는 주파수 항들의 위상(phase)이 180° 가 되어 최종 광 검출기(high speed photodetector)(24)를 통과하여 나온 광 신호는 ω_{RF} 만이 검출되므로 선형성이 증가된다 [K. K. Loi, J. H. Hodiak, X. B. Mei, C. W. Tu and W. S. C. Chang, "Linearization of $1.3-\mu\text{m}$ MQW Electroabsorption Modulators Using an All-Optical Frequency-Insensitive Technique", IEEE photon. Technol. Lett., vol.10, no.7, July 1998, pp.964-966 참조].

<30> 도 3은 전계흡수형 광 변조기에 인가되는 전기신호에 왜곡(predistortion)을 가하는 구조로서, 광 변조기에 실리는 전기적인 신호에 왜곡(predistortion)을 가하여 광 변조기의 선형성을 향상시킨다. 전기적인 왜곡에 앞서 광 변조기의 바이어스 전압을 2nd harmonic distortion이 0이 되는 점 즉, 전달함수 상의 변곡점에 해당되는 지점으로 선택한다. 이렇게 하면 광 변조기의 선형성에 영향을 주는 항이 2nd order 항을 제외한 even order harmonic 항들과 odd order harmonic 항이 남게 된다. 실제로 harmonic 항들의 차수가 높아질수록 그 크기가 급격히 감소하여 harmonic distortion을 고려할 때 2차와 3차 항만을 고려하면 된다. 그런데 2차 항이 0이 되도록 바이어스 전압을 정했으므로 3차 항을 0이 되도록 전기적인 신호를 왜곡시킨다. 도 3을 보면 입력신호(V_{in})가 2개로 분기된 후 하나의 입력신호는 지연선로(delay line)를 통해 그대로 진행하고, 다른 하나의 입력신호는 비선형 발생기(31)를 통해 odd order nonlinearity를 갖는 신호로 왜곡된다. 이 신호들이 합해져 광 변조기(32)로 입력되면 광 변조기(32)에서 전달함수의 odd order harmonic distortion 항들이 최소가 되도록 작용하여 광 변조기(32)의 선형성이 향상된다 [Gordon C. Wilson, Thomas H. Wood, M. Gans, J. L. Zyskind, J. W. Sulhoff, J. E. Johnson, T. Tanbun-Ek, and Paul A. Morton, "Predistortion of Electroabsorption Modulators for Analog CATV Systems at 1.55 μm ", J. Lightwave Technol. vol.15, no.9, September 1997, pp.1654-1662 참조].

<31> 상술한 바와 같이 기존에는 전계흡수형 광 변조기의 선형성을 향상시키기 위해 외부 광 또는 전기회로를 추가적으로 구성하므로써 시스템이 복잡해지고 부피가 증가된다. 특히, ROF 시스템과 같이 초고주파를 케리어 주파수로 이용하는 시스템에서는 전파의 이동거리가 짧기 때문에 많은 수의 기지국(base station)이 필요하게 된다. 그러므로 상기 예시한 기존의 기술보다 간단한 방법으로 광 변조기의 선형성을 개선할 수 있는 기술의 개발이 요구된다.

【발명이 이루고자 하는 기술적 과제】

<32> 따라서 본 발명은 전계흡수형 광 변조기의 흡수층을 서로 다른 너비를 갖는 양자우물들로 구성하여 전기-광 전달함수 특성을 변화시킴으로써 상기한 단점을 해소할 수 있는 다중양자우물을 갖는 전계흡수형 광 변조기를 제공하는 데 그 목적이 있다.

<33> 상기한 목적을 달성하기 위한 본 발명은 다중양자우물로 이루어진 흡수층과, 상기 흡수층의 상부 및 하부에 각각 형성된 상부 및 하부 클래드층과, 상기 흡수층에 전기장을 형성하기 위한 전극을 포함하며, 상기 흡수층이 서로 다른 너비를 갖는 두 양자우물들의 조합으로 구성된 것을 특징으로 한다.

<34> 상기 두 양자우물은 너비가 좁은 우물과 넓은 우물에 대해 $m : n$ 의 비율로 조합되며, $m > n$ 인 것을 특징으로 한다.

【발명의 구성 및 작용】

<35> 본 발명은 전계흡수형 반도체 광 변조기의 전기-광 전달함수(이하, 전달함수라 칭한다) 특성을 변화시키기 위해 다중양자우물로 이루어지는 흡수층을 너비가 다른 양자우물들의 조합으로 구성한다. 전계흡수형 광 변조기의 전달함수를 이해하기 위해서는 먼저 광 변조기의 동작을 알아야 하는데, 이를 위해 광 변조기의 동작을 간단히 설명하기로 한다.

<36> 도 4a는 본 발명의 실시예에 따른 전계흡수형 광 변조기의 단면도이고, 도 5a는 도 4a의 광 변조기를 제작하기 전의 에피 구조를 도시한 단면도이다.

<37> n형 InP 기판(43) 상에 흡수층(42) 및 p형 InP 클래드층(41)이 적층되며, 상기 n형 InP 기판(43)의 하부에는 n형 전극(45)이 형성되고, 상기 p형 InP 클래드층(41) 상부에는 p형 전극

(44)이 형성된다. 도면에서 도면부호 47은 입력광을, 도면부호 48은 출력광을 도시하며, 도면부호 46은 코팅된 폴리이미드(polyimide)를 도시한다.

<38> 상기와 같이 광 변조기의 에피는 p형 반도체(41) - 진성(intrinsic) 양자우물 흡수층(42) - n형 반도체(43)의 접합으로 이루어지며, 광의 변조는 양자우물 흡수층(42)에서 일어나게 된다.

<39> 도 5b는 도 5a에 도시된 양자우물 흡수층(42)의 흡수 스펙트럼으로, 전기장이 인가되지 않았을 때와 인가되었을 때의 흡수 스펙트럼의 변화를 도시한다. 점선으로 표시된 부분이 흡수 스펙트럼의 흡수에지(absorption edge)이다. 인가되는 전기장의 크기가 증가함에 따라 장파장 쪽으로 이동하게 된다. 즉, 전기장의 유무에 따라 정해진 동작파장에서 흡수가 일어나 광 변조를 일으킨다. 이 때 동작파장($1.55\mu\text{m}$)은 광 신호 변조가 일어나는 입력광의 파장으로 전기장이 인가되지 않았을 때는 양자우물의 흡수에지보다 장파장쪽에 위치하게 되므로 입력광을 그대로 통과시킨다. 동작파장에서 광 흡수에 영향을 미치는 부분은 흡수 스펙트럼 상의 흡수에지에 해당되며, 이 흡수에지의 거동(behavior)이 전계흡수형 광 변조기의 동작 특성을 좌우한다. 양자우물 흡수층(42)의 흡수 스펙트럼에서 흡수에지는 엑시톤의 흡수 스펙트럼에 해당한다. 전기장의 인가에 따른 엑시톤의 흡수 스펙트럼은 다음과 같다.

<40> 엑시톤은 전자와 정공이 약한 쿨롱(Coulomb) 힘으로 결합된 상태로서, 엑시톤의 에너지는 하기의 수학식 1과 같이 나타낼 수 있다.

<41> 【수학식 1】 $E_i(V) = \Delta E_g + E_{l-e}(V) + E_{l-hh}(V) - \text{exciton binding energy}(V)$

<42>

상기 수학식 1에서 ΔE_g 는 양자우물(quantum well)을 이루는 물질과 장벽(barrier)을 이루는 물질의 에너지 차이(에너지 밴드갭), E_{1-e} , E_{1-hh} 는 각각 전자와 무거운 정공(heavy hole)의 기저상태 에너지를 나타낸다.

<43>

상기 수학식 1에서 전기장과 관련이 있는 부분은 전자와 무거운 정공의 기저상태 에너지와 엑시톤 결합 에너지이다. 여기서 엑시톤의 결합 에너지는 그 크기가 미약하므로 실제로 전기장이 가해졌을 때 전자와 무거운 정공의 기저상태 에너지의 변화가 엑시톤 에너지의 변화를 주도한다. 이 때 전기장에 대한 엑시톤의 흡수 스펙트럼의 변화는 하기의 수학식 2와 같이 quantum confined stark effect(QCSE)로 나타낼 수 있다.

<44>

$$E_1 - E_1^0 = C_1 \frac{e^2 F^2 (m_e^* L_{eff-e}^4 + m_{hh}^* L_{eff-hh}^4)}{n^2}$$

【수학식 2】

<45>

상기 수학식 2는 전기장이 인가되었을 때 기저상태 엑시톤 에너지의 변화량을 나타낸다. 상기 수학식 2에서 E_1 은 전기장이 인가되었을 때의 기저상태 엑시톤 에너지, E_1^0 은 전기장이 인가되지 않았을 때 기저상태 엑시톤 에너지, $C_1 = -2.19 \times 10^{-3}$ 의 값을 갖는 상수, m_e^* , m_{hh}^* 는 각각 전자와 무거운 정공의 유효질량, F 는 전기장의 세기, L_{eff-e} , L_{eff-hh} 는 각각 전자와 무거운 정공에 대한 우물의 유효 너비이다.

<46>

우물의 유효 너비는 유한 양자우물에서 기저상태의 에너지와 크기가 같은 기저상태 에너지를 갖는 무한 양자우물의 너비이다. 전기장이 인가되었을 때 엑시톤의 기저상태 에너지의 감소는 우물의 유효너비의 네 제곱에 비례하고 전기장 세기의 제곱에 비례한다. 엑시톤의 기저상태 에너지의 감소는 양자우물에서의 흡수에지의 장파장쪽으로의 이동과 같으므로 결국, 전기장에 따른 흡수에지의 장파장쪽으로의 이동은 우물의 유효너비의 네 제곱과 전기장 세기의 제곱에 비례한다고 할 수 있다. 또 5b는 8nm의 너비를 갖는 양자우물의 흡수 스펙트럼으로 QCSE를

잘 보여주고 있다. 또한, 전기장이 양자우물에 인가되면 엑시톤의 흡수세기도 감소하게 된다. 따라서 도 5b에 도시된 두개의 그래프를 비교해 보면 전기장이 인가되었을 때 흡수에지가 장파장쪽으로 이동하면서 흡수계수(absorption coefficient)도 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 전기장에 따른 양자우물에서 흡수에지의 이동 여부는 광을 변조할 때 이용하게 된다. 도 5b에서 볼 수 있듯이 동작파장에서의 흡수계수는 전기장이 인가되지 않았을 때 0에 가깝다가 전기장이 인가되면 급격히 증가됨으로써 전기장의 인가 여부 또는 인가된 전기장의 세기에 따라 입력대비 출력되는 빛의 양을 다르게 하여 광 변조가 일어날 수 있게 한다. 만약, 도 5b에서 양자우물의 너비가 12nm라면, 즉, 너비가 더 넓은 양자우물이면, 흡수에지의 장파장쪽으로의 이동 정도는 더욱 커질 것이다(엑시톤의 기저상태 에너지 감소 정도는 우물의 유효너비의 네제곱에 비례한다). 그러므로 전기장이 인가되었을 때 양자우물의 너비에 따른 흡수에지의 이동 정도의 차이는 광 변조기의 선형성을 향상시키는 데 이용될 수 있다. 광 변조기의 전달함수는 하기의 수학식 3 및 4와 같이 지수함수로 나타낼 수 있다.

$$<47> \quad \text{【수학식 3】} \quad P_{out} = P_{in} \exp(-(V/V_0)^a)$$

$$<48> \quad \text{【수학식 4】} \quad P_{out} = P_{in} \exp(-\Gamma \cdot \alpha(V) \cdot l)$$

<49> 상기 수학식 3에서 P_{out} 은 광 변조기에서 출력되는 빛의 세기, P_{in} 은 입력되는 빛의 세기, V 는 광 변조기에 인가되는 전압, V_0 는 출력되는 빛의 세기가 P_{in}/e 만큼 되는 전압, a 는 전달함수의 모양을 나타내는 변수로 양자우물의 너비, 양자우물에서의 에너지 밴드갭 즉, 양자우물과 장벽의 물질 조성비, 그리고 광 변조기에서 변조가 일어나는 도파로의 길이와 관련이 있고, 상기 수학식 4에서 Γ 는 optical confinement factor, $\alpha(V)$ 는 전압에 따른 양자우물의 흡수계수, l 은 광 변조기의 도파로 길이이다.

<50> 도 4b는 도 4a에 도시된 구조의 광 변조기에서 측정되는 전달함수를 대략적으로 나타내고 있다. 좁은 우물(narrow well)과 넓은 우물(wide well)은 상대적으로 너비가 좁은 우물과 넓은 우물을 지칭한다. 예를 들어, 상기 예시한 것과 같이 8nm의 너비를 갖는 양자우물은 좁은 우물이고 12nm의 너비를 갖는 양자우물은 넓은 우물이 된다. 너비가 다른 두개의 양자우물에서 나타나는 전달함수의 특성을 이해하기 위해 무한 양자우물을 예를 들어 설명하면 다음과 같다.

<51> 무한 양자우물에서 전자 또는 정공의 기저상태의 에너지는 하기의 수학식 5와 같이 나타낼 수 있다.

<52> 【수학식 5】 $E_1 = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m \cdot L}$

<53> 상기 수학식 5에서 E_1 은 기저상태의 전자 또는 정공의 에너지, \hbar 는 폴랑크 상수, m^* 은 전자 또는 정공의 유효질량, L 은 양자우물의 너비이다.

<54> 우물의 너비가 넓어지면 전자 또는 정공의 에너지는 작아지고, 반대로 우물의 너비가 좁아지면 에너지는 커지게 된다. 따라서 좁은 우물(narrow well)의 기저상태의 엑시톤 에너지가 넓은 우물(wide well)의 기저상태의 엑시톤 에너지보다 더 크게 되고, 이는 동작파장에 대한 detuning 에너지가 더 크게 됨을 의미한다(여기서, detuning 에너지는 전기장이 인가되지 않았을 때의 엑시톤의 기저상태 에너지와 동작파장의 에너지 차이에 해당되는 에너지를 지칭한다). 즉, 좁은 우물의 흡수에지가 넓은 우물에 비해 동작파장에서 더 멀리 떨어져 있으므로 흡수에지가 동작파장까지 이동하는 데 더 큰 전기장을 필요로 하게 되며, 흡수에지가 동작파장 근처로 이동하기까지 광 변조기에서의 흡수는 거의 일어나지 않다가 동작파장 근방에 이르러 급격한 흡수가 일어나게 된다. 그리고 넓은 우물의 경우 엑시톤의 기저상태 에너지가 동작파장에 더 가까이 위치해 있으므로 적은 전압 영역부터 흡수가 급격히 일어나게 되어 전달함수의 모양

에서 좁은 우물과 넓은 우물이 도 4b와 같이 서로 다른 모양을 가지게 된다. 도 4b에서 직선 (C)은 신호왜곡이 전혀 없는 이상적인 광 변조기의 전달함수를 나타낸다. 이와 같은 전달함수를 만들기 위해 좁은 우물(D)과 넓은 우물(E)을 적절히 조합하면 특정 전압 범위에서 선(C)과 같이 직선에 가까운 전달함수를 만들 수 있다.

<55> 그러면 각각의 전달함수를 어떻게 조합하여야 하는가? 전달함수를 조합하기 위해 간단한 가정을 한 후 수식적으로 접근하도록 한다. 흡수층이 좁은 우물로 구성된 광 변조기 1과 흡수층이 넓은 우물로 구성된 광 변조기 2가 있고, 두개의 광 변조기는 흡수층에 들어가는 양자우물의 너비만 다를 뿐 물질의 조성비와 흡수층의 총 두께를 비롯하여 모든 면(예를 들어, 에피구조, 도파로 너비와 길이, 도평농도 등)에서 동일하다고 가정하면, 상기 두 광 변조기의 전달함수는 하기의 수학식 6 및 7과 같이 각각 나타낼 수 있다.

<56> 【수학식 6】 $P_1(V) = P_{in} \exp(-\Gamma \cdot \alpha_1(V) \cdot l)$

<57> 【수학식 7】 $P_2(V) = P_{in} \exp(-\Gamma \cdot \alpha_2(V) \cdot l)$

<58> 상기 수학식 6 및 7에서, $P_1(V)$, $P_2(V)$ 는 각각 광 변조기 1과 광 변조기 2에서 출력되는 광의 세기이고, P_{in} 은 입력 광 세기, Γ 는 optical confinement factor, $\alpha_1(V)$, $\alpha_2(V)$ 는 좁은 우물과 넓은 우물의 전압에 따른 흡수계수, l 은 광 변조가 일어나는 도파로의 길이이다.

<59> 만일 새로운 광 변조기 3의 흡수층이

L_1 의 너비를 갖는 좁은 우물과 L_2 의 너비를 갖는 넓은 우물이 $m : n$ 의 비율로 구성되어 있고, 흡수층의 두께 및 모든 구조가 광 변조기 1 및 광 변조기 2와 동일하다면, 광 변조기 3의 optical confinement factor는 광 변조기 1 그리고 광 변조기 2와 같을 것이다. 광 변조기 3의 흡수층에서 각 우물에 분포되는 optical field가 동일하다고 가정하면 optical confinement factor는 좁은 우물과 넓은 우물에 대하여 $L_1 m : L_2 n$ 의 비율로 나누어질 것이다. 그러므로 광 변조기 3의 전달함수는 하기의 수학식 8과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & <60> \quad P_3(V) = P_{in} \exp \left(-\alpha_1(V) \cdot \Gamma \frac{mL_1}{mL_1 + nL_2} \cdot l - \alpha_2(V) \cdot \Gamma \frac{nL_2}{mL_1 + nL_2} \cdot l \right) \\
 & \quad = (P_{in} \exp (-\alpha_1(V) \cdot \Gamma \cdot l))^{\frac{mL_1}{mL_1 + nL_2}} \cdot (P_{in} \exp (-\alpha_2(V) \cdot \Gamma \cdot l))^{\frac{nL_2}{mL_1 + nL_2}} \\
 & \quad = P_1^{\frac{mL_1}{mL_1 + nL_2}}(V) \cdot P_2^{\frac{nL_2}{mL_1 + nL_2}}(V)
 \end{aligned}$$

【수학식 8】

<61> 다음으로, 상기 수학식 8과 같이 조합된 전달함수의 선형성에 대하여 살펴보기로 한다. 광 변조기의 선형성은 IMD로 평가할 수 있다. 상기 광 변조기 3에 두개의 신호를 인가한다고 할 때 인가되는 전압은 하기의 수학식 9와 같이 나타낼 수 있다.

$$<62> \quad \text{【수학식 9】} \quad V = V_b [1 + m_e (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t)]$$

<63> 상기 수학식 9에서 V_b 는 바이어스 전압, m_e 는 electrical modulation depth 이다. 상기 수학식 9를 수학식 8에 대입하여 V 에 대하여 Taylor 전개하여 정리하면 각 주파수 신호 (fundamental 주파수)에 대한 harmonic 주파수 항들이 나타나게 된다. 이는 광 변조기의 전달 함수의 비선형성으로 인해 생성되는 것으로써 Fundamental 신호와 harmonics 신호들에 의해 생성되는 부가적인 신호의 파워비가 IMD가 되며 IMD 2 와 IMD 3는 하기의 수학식 10 및 11과 같이 정리된다.

$$<64> \quad \text{【수학식 10】} \quad IMD2 = 20 \cdot \log \left(\left| \frac{P_3''(V_b)}{2P_3'(V_b)} \right| \cdot (m_e V_b) \right)$$

<65>

$$【수학식 11】 \quad IMD3 = 20 \cdot \log \left(\left| \frac{P_3''(V_b)}{8P_3'(V_b)} \right| \cdot (m_e V_b)^2 \right)$$

<66>

특히, ROF 시스템과 같은 suboctave link에서는 IMD 3(3rd order intermodulation distortion)가 선형성을 판단하는 중요한 지표가 된다. 상기 수학식 10 및 11에서 $P_3''(V_b)$, $P_3'(V_b)$, $P_3(V_b)$ 는 각각 광 변조기 3의 전달함수에 대한 3차 미분, 2차 미분 그리고 1차 미분 값이다.

<67>

이제 어떤 양자우물의 조합이 선형성을 향상시킬 수 있는지에 대해 알아보기로 한다. 전계흡수형 광 변조기의 전달함수의 모양은 상기 수학식 3과 같이 지수함수의 형태로 나타낼 수 있는데, 실제 제작된 광 변조기의 전달함수를 수학식 3으로 맞추면 매우 잘 맞아 임의의 양자우물에 대한 전달함수의 모양은 a 와 V_0 로 나타낼 수 있다는 결론에 도달한다. 도 6a 및 도 6b는 V_0 및 a 값에 대한 전달함수의 모양을 보여준다. 통상적으로 전계흡수형 광 변조기에서 a 와 V_0 값은 4 이하가 된다. a 는 양자우물의 너비, 양자우물에서의 에너지 밴드갭 즉, 양자우물과 장벽의 물질 조성비, 그리고 광 변조기에서 변조가 일어나는 도파로의 길이와 관련이 있는 변수이다. 동작파장으로부터 흡수에지가 멀리 떨어질수록 그리고 전기장에 대한 흡수에지의 이동 정도가 느릴수록 a 는 커지게 된다. 즉, 양자우물과 장벽의 물질 조성비를 조절하여 에너지 밴드갭을 크게 만들면 a 는 커질 것이고, 또한 동일한 물질 조성비를 갖고 있더라도 양자우물의 너비가 좁아지면 엑시톤의 흡수에지가 더 단파장쪽으로 이동하므로 a 는 커질 것이다. 그러므로 넓은 우물과 좁은 우물의 경우에 있어서 좁은 우물에 비하여 넓은 우물은 엑시톤 흡수에지가 동작파장에 가까이 위치해 있고 전기장에 대한 흡수에지의 장파장으로의 이동 정도가 좁은 우물의 경우보다 더 크므로 넓은 우물의 a 값은 좁은 우물의 a 값보다 적은 값을 갖는다. 전달함수의 모양과 관련이 있는 변수 a 와 V_0 값을 주어진 범위(< 4) 내에서 변화시키

면서 각각의 전달함수들을 상기 수학식 8을 이용하여 조합하고, 상기 수학식 11을 사용하여 선형성을 살펴보았을 때 선형성이 향상되어지는 것을 알 수 있다. 특히, 두개의 전달함수를 조합할 때 넓은 너비의 양자우물에 대한 전달함수가 $a=1.0$ 근방일 때 선형성의 향상 정도가 커졌다. 도 7a는 8nm의 너비를 갖는 양자우물 $a=1.85, V_0=1.83$ 과 10nm의 너비를 갖는 양자우물 $a=0.71$, 그리고 12nm의 너비를 갖는 양자우물 $a=1.0, V_0=0.4$ 에 대한 전달함수와, 8nm의 너비를 갖는 양자우물과 12nm의 너비를 갖는 양자우물을 3 : 1로 조합하여 만들어진 전달함수를 각각 보여주고 있다. 도 7a에서 8nm와 10nm의 너비를 갖는 양자우물의 전달함수는 실제로 제작된 광변조기에서 측정된 것이며, 12nm의 너비를 갖는 양자우물의 전달함수는 가정된 것이다. 하기의 표 1은 제작된 광변조기의 전달함수에 대한 맞춤(fitting) 변수이다.

<68> 【표 1】

파라미터	우물 너비(8nm)	우물 너비(9nm)	우물 너비(10nm)	우물 너비(>10nm)
a	1.85	1.68	1.32	1.0 ~ 1.3
V_0	1.83	1.08	0.71	0.3 ~ 0.7

<69> 우물의 너비가 커질수록 a 값이 작아져 너비가 10nm일 때 1.32이고 3 종류의 우물 너비에 대해 V_0 는 a 값보다 적은 값을 가졌다. 이러한 결과를 토대로 생각해 볼 때 양자우물의 너비가 10nm보다 커지면 a 값이 1.0에 가까워 질 것을 짐작할 수 있다. 따라서 양자우물 $a=1.0, V_0=0.4$ 에 대한 너비는 12nm로 가정할 수 있다. 계산상에서 양자우물의 너비는 12nm가 아닌 11nm나 13nm로 계산하여도 선형성이 향상되는 것을 확인하였다. 도 7a에서 8nm의 너비를 갖는 양자우물과 12nm의 너비를 갖는 양자우물의 조합으로 만들어진 전달함수는 두 전달함수의 가운데 위치하며 10nm의 너비를 갖는 양자우물의 전달함수와 그 모양이 비슷하다.

<70> 그러면 10nm의 너비를 갖는 양자우물의 전달함수의 선형성과 조합된 양자우물의 전달함수의 선형성은 어떻게 다른지 비교해 보기로 하자. 도 7b는 도 7a의 전달함수들에 대한 IMD 3 특성을 보여주고 있다. 도 7b에서와 같이 조합된 양자우물의 전달함수가 가장 좋은 IMD 3 특성을 보여주며, 단일 양자우물의 전달함수들의 IMD 3 특성 정도는 거의 비슷하였다. 특히 12nm의 너비를 갖는 양자우물의 전달함수의 경우, 바이어스 전압이 증가함에 따라 IMD 3가 급격히 커져 아날로그 광 변조기의 흡수층으로는 부적합함을 알 수 있다. 결론적으로 전달함수의 모양은 비슷하지만 10nm의 너비를 갖는 양자우물 전달함수의 선형성과 조합된 양자우물 전달함수의 선형성은 그 차이가 매우 크며, 단일 너비의 양자우물에 비해 좁은 우물과 좁은 우물로 조합된 양자우물은 높은 선형성이 요구되는 아날로그 광 변조기에 적합함을 알 수 있다.

<71> 지금까지는 다중양자우물을 갖는 전계흡수형 광 변조기의 선형성을 향상시키기 위해 흡수층의 양자우물이 좁은 우물과 넓은 우물로 조합된 구조를 살펴보았다. 즉, 도 4b와 같이 모양이 서로 다른 전달함수를 양자우물의 너비가 좁은 것과 넓은 것을 선택하여 얻고, 그것을 조합하여 최종 전달함수의 선형성을 향상시킬 수 있었다.

<72> 도 8a는 본 발명의 바람직한 실시예에 따른 광 변조기의 에피 구조를 도시한 단면도로서, n형 InP 기판(43) 상에 흡수층(42)과 P형 InP 클래드층(41)이 적층된 구조를 가지며, 상기 흡수층(42)이 좁은 우물(42a)과 넓은 우물(42b)의 조합 즉, 좁은 우물(42a)과 넓은 우물(42b)이 3 : 1의 조합으로 구성된다. 여기서, 3:1의 조합은 양자우물의 비가 아닌 OCF(optical confinement factor)의 비를 의미한다. 상기 설명에서 OCF와 양자우물의 비를 같게 놓기 위해서는 각 양자우물에 분포되는 optical field가 동일하다는 가정이 필요했다. 그러나 실제로 optical field 분포는 흡수층의 각 부분에 따라 다르므로 양자우물의 비는 OCF의 비와 같을 수도 있고 다를 수도 있다. 도 8b는 좁은 우물과 넓은 우물에 대한 OCF와 양자우물의

비가 3:1인 흡수층의 상대적인 굴절률과 optical field의 그래프이다. OCF가 3:1이 되도록 하기 위해 좁은 우물 사이에 넓은 우물이 4, 7, 12번째로 위치되어 있다. 그리고 상기에서 예로 든 3:1의 비는 실시예를 들기 위함이며 특정 전압 범위에서 선형성을 향상시키기 위한 조합은 얼마든지 존재할 수 있다.

<73> 본 실시예에서는 n형 InP 기판(43)을 하부 클래드층으로 사용한다. 또한, 상기 흡수층(42)은 예를 들어, InGaAsP/InGaAsP 구조로 형성하는데, $In_{(1-x)}Ga_xAs_{(y)}P_{(1-y)}$ 에서 각 물질의 조성(x, y)을 조절하면 InGaAsP의 에너지 밴드갭이 달라진다. 장벽과 양자우물은 에너지 밴드갭이 서로 달라야 하므로 장벽과 양자우물의 조성을 달리하여 번갈아 성장시키면 다중양자우물의 흡수층을 구현할 수 있다.

<74> 본 발명의 기술 사상은 상기 바람직한 실시예에 따라 구체적으로 기술되었으나, 상기한 실시예는 그 설명을 위한 것이며, 그 제한을 위한 것이 아님을 주지하여야 한다. 또한, 본 발명의 기술 분야에서 통상의 전문가라면 본 발명의 기술 사상의 범위 내에서 다양한 실시예가 가능함을 이해할 수 있을 것이다.

【발명의 효과】

<75> 상술한 바와 같이 본 발명은 전계흡수형 광 변조기의 흡수층을 서로 다른 너비를 갖는 양자우물의 조합으로 구성하여 전기-광 전달함수 특성을 변화시킴으로써 광 변조기의 선형성을 향상시킬 수 있다.

<76> 종래에는 선형성을 향상시키기 위해 외부 광 또는 전기회로를 추가적으로 구성하여 시스템이 복잡해지고 부피가 증가되었으나, 본 발명은 간단하고 또한 외부 회로의 동작속도에 제한을 받지 않음으로써 초고주파 아날로그 광전송 시스템을 용이하게 구현할 수 있다.

【특허청구범위】

【청구항 1】

흡수층;

상기 흡수층의 상부 및 하부에 각각 형성된 상부 및 하부 클래드층; 및

상기 흡수층에 전기장을 인가하기 위한 전극들을 포함하여 구성되며,

상기 흡수층은 서로 다른 너비를 갖는 2개의 양자우물들의 조합으로 구성되는 것을 특징으로 하는 전계흡수형 광 변조기.

【청구항 2】

제 1 항에 있어서, 상기 2개의 양자우물들은 너비가 좁은 양자우물과 넓은 양자우물이 $m : n$ ($m > n$)의 비율로 조합되는 것을 특징으로 하는 전계흡수형 광 변조기.

【청구항 3】

제 2 항에 있어서, 상기 너비가 좁은 양자우물의 a 값(하기의 수학식 12에 의해 정의됨)이 상기 너비가 넓은 우물의 a 값보다 큰 것을 특징으로 하는 전계흡수형 광 변조기.

$$【수학식 12】 \quad P_{out} = P_{in} \exp(-(V/V_0)^a)$$

【청구항 4】

제 3 항에 있어서, 상기 너비가 좁은 양자우물의 a 값은 상기 너비가 넓은 양자우물의 a 값보다 0.5 이상 큰 것을 특징으로 하는 전계흡수형 광 변조기.

【청구항 5】

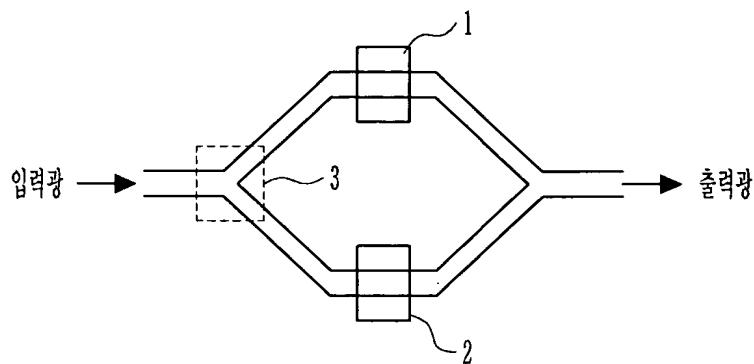
제 1 항에 있어서, 상기 흡수층은 InGaAsP 계열로 이루어진 것을 특징으로 하는 전계흡수형 광 변조기.

【청구항 6】

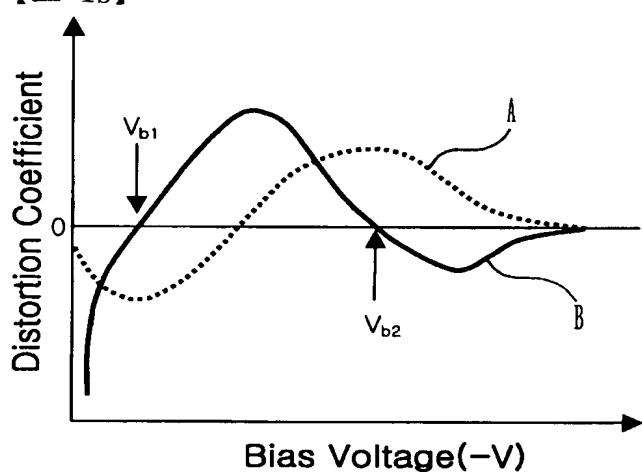
제 1 항에 있어서, 상기 하부 클래드층은 반도체 기판으로 이루어진 것을 특징으로 하는 전계흡수형 광 변조기.

【도면】

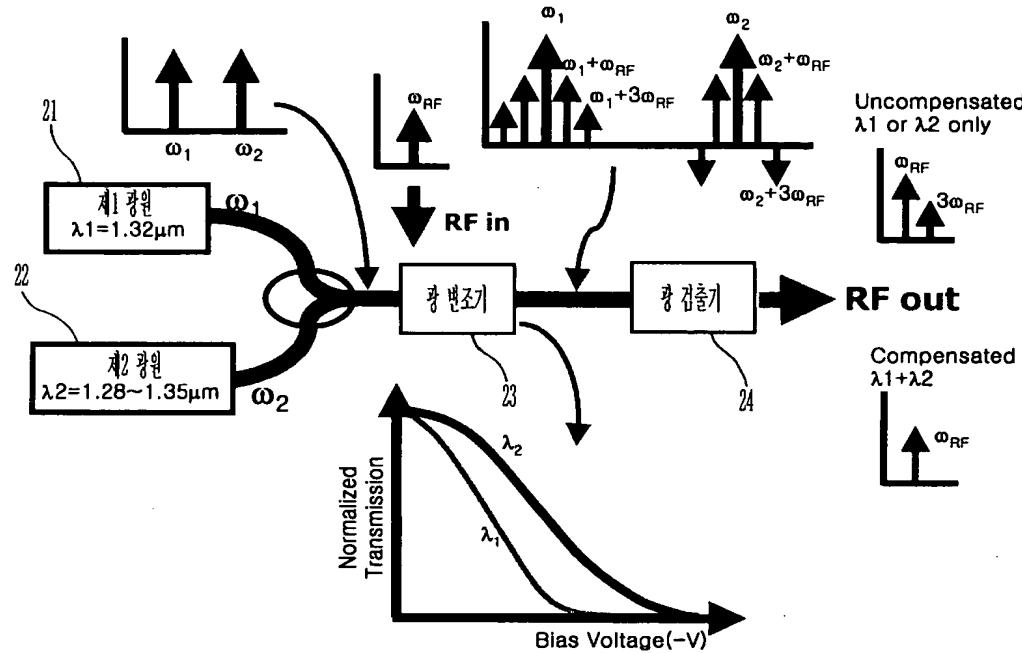
【도 1a】



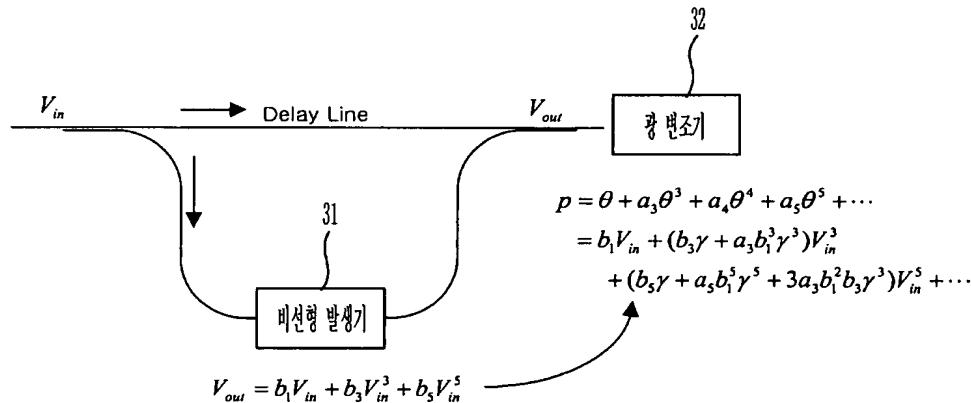
【도 1b】



【도 2】



【도 3】



$$p = (P - P_0)/P_0, \quad \theta = \gamma(V - V_0)$$

p : Normalized transmitted power

P : Total power

P_0 : Average power

θ : Modulation signal

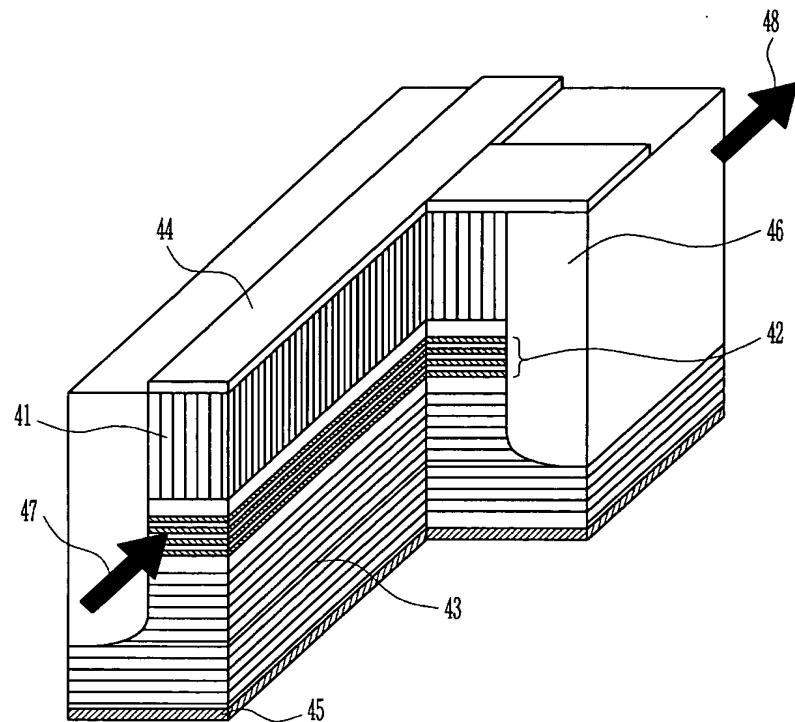
γ : Modulation efficiency

V_0 : Bias Voltage

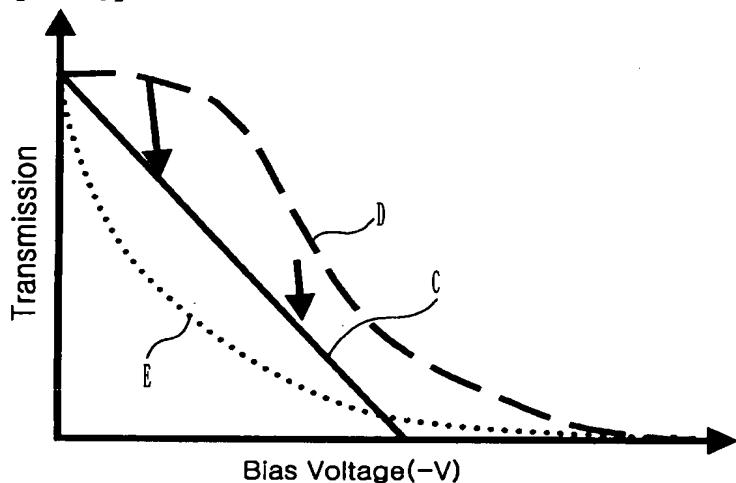
$$b_3 = -\gamma^2 b_1^3 a_3 \quad \text{and}$$

$$b_5 = \gamma^4 b_1^5 (3a_3^2 - a_5)$$

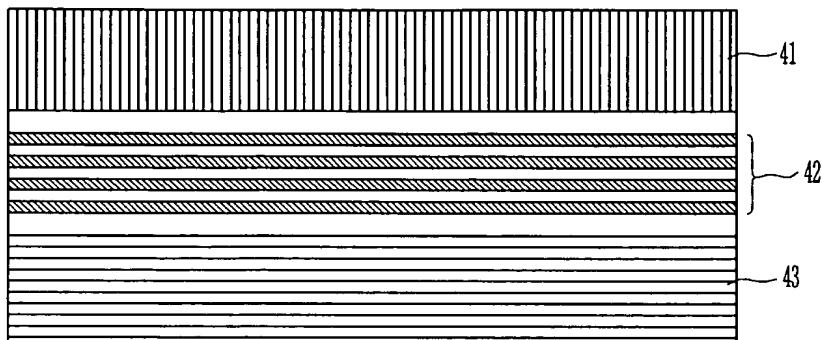
【도 4a】



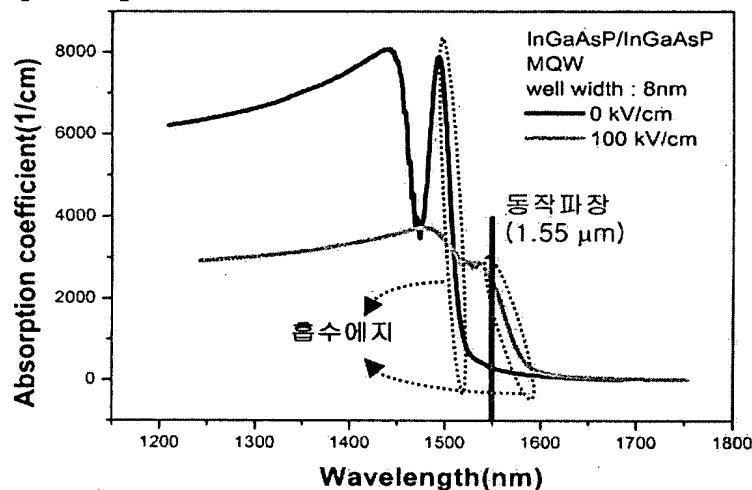
【도 4b】



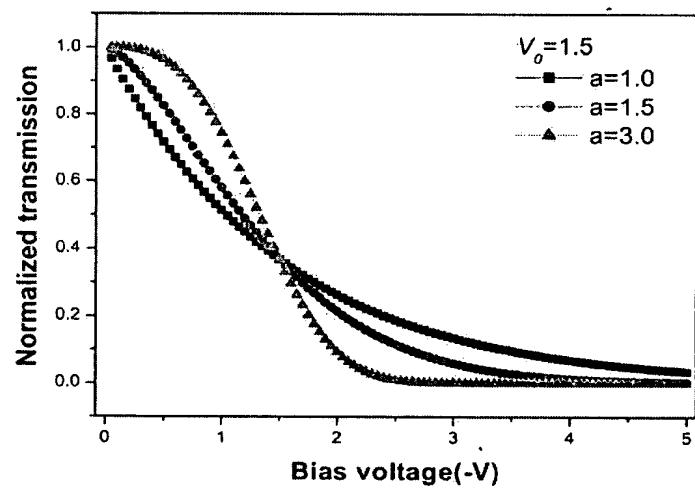
【도 5a】



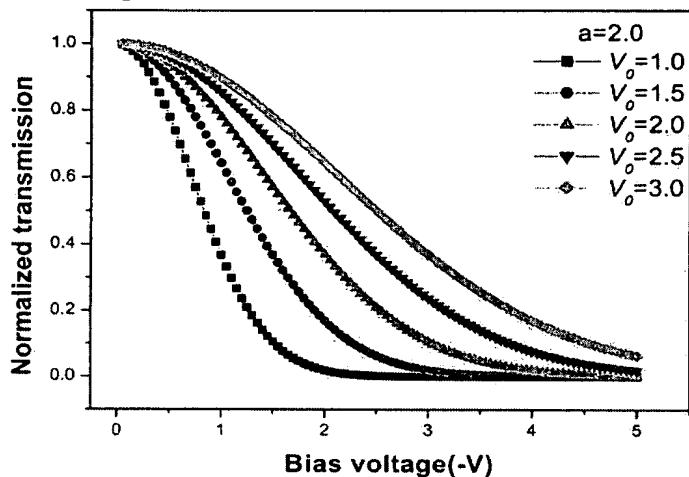
【도 5b】



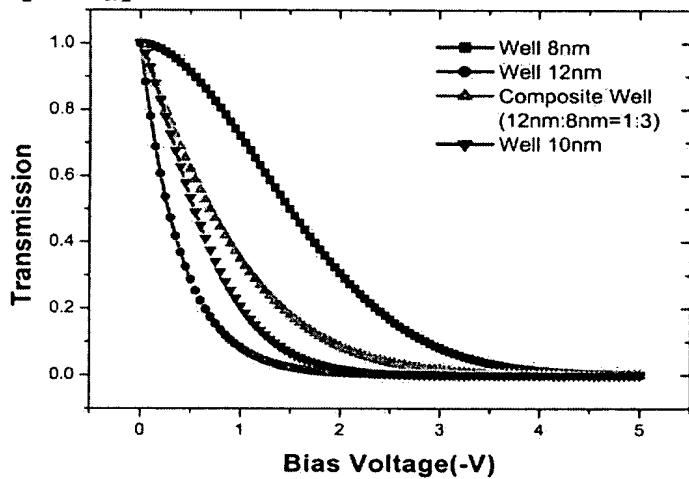
【도 6a】



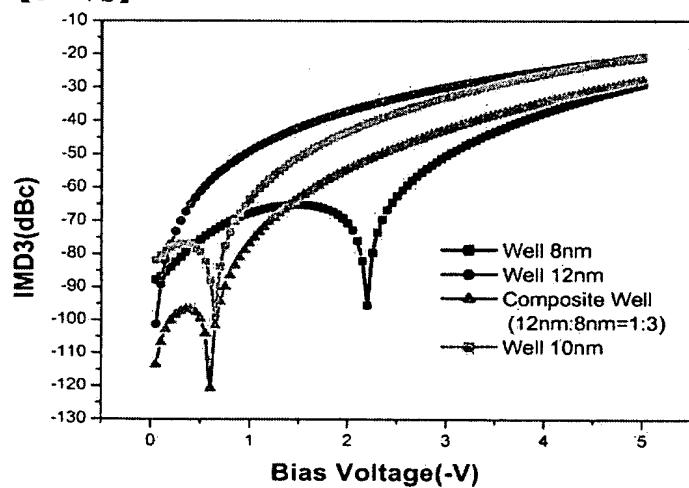
【도 6b】



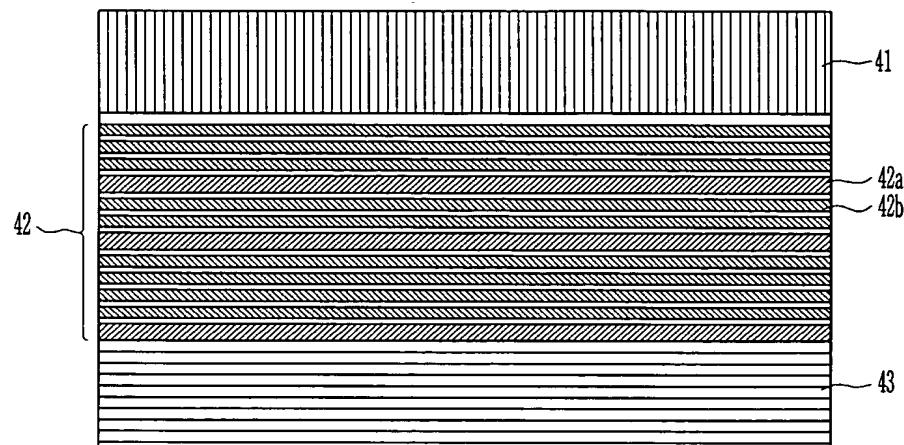
【도 7a】



【도 7b】



【도 8a】



【도 8b】

